

# Rios



Aumento do fluxo das águas nas planícies de inundação da bacia do Amazonas nos últimos 20 anos pode ampliar erosão e pressionar comunidades ribeirinhas

IGOR ZOLNERKEVIC

**O** mais extenso e volumoso rio do mundo vem ganhando mais superlativos, dessa vez preocupantes. O Amazonas percorre cerca de 6.900 quilômetros (km), de suas cabeceiras na cordilheira dos Andes peruana ao oceano Atlântico, formando a maior bacia hidrográfica do mundo. No município de Óbidos, no Pará, a 800 km de sua foz, a vazão média do rio chegou a 160 mil metros cúbicos por segundo ( $m^3/s$ ) – um valor comparável à soma dos outros sete rios mais caudalosos do planeta. Durante três a oito meses por ano, o Amazonas inunda vastas áreas de sua várzea, entre 10 km e 100 km de largura, levando sedimentos e nutrientes para florestas, zonas rurais e urbanas por meio de uma rede intrincada de canais e lagos adjacentes. Nas últimas décadas, porém, o rio vem sofrendo com secas e inundações cada vez mais extremas. Du-



# mais largos

rante as grandes enchentes de 2009 e 2021, na planície alagada, também chamada de várzea ou planície de inundação, de Parintins, no estado do Amazonas, a vazão quebrou recordes históricos, ultrapassando os 40 mil m<sup>3</sup>/s – quase a mesma vazão média do Congo, o principal rio da segunda maior bacia hidrográfica do mundo, na África.

Essa é uma das conclusões de um estudo realizado por uma equipe de hidrólogos do Brasil, França e Reino Unido, que combinou medidas do nível e da vazão do rio, imagens de satélite e modelos computacionais para reconstituir o histórico até então desconhecido do fluxo das águas em quatro planícies de inundação do baixo Amazonas, entre os municípios de Manaus, no Amazonas, e Santarém, no Pará, de 1970 a 2023. A pesquisa liderada pela hidróloga Alice Fassoni de Andrade, da Universidade de Brasília (UnB), mostrou mudanças surpreendentes nessa região a partir de 2005. Entre esse ano e 2023, a vazão

do rio aumentou 4,7% em relação ao período de 1970 a 2004. O aumento registrado na planície do Lago Grande do Curuai, em Santarém, em frente a Óbidos, chegou a 60% – um aumento relativo 13 vezes maior, cujas consequências para a floresta de várzea e as comunidades ribeirinhas ainda precisam ser mais bem compreendidas.

“Já havia estudos mostrando o aumento da vazão no rio, mas não nas planícies”, conta Andrade. Sua pesquisa começou ainda durante seu doutorado, defendido em 2020, sob orientação do hidrólogo Rodrigo de Paiva, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), coautor do artigo publicado em março na *Environmental Research Letters*. Andrade dedicou o capítulo final de sua tese ao desenvolvimento de um modelo computacional de um trecho de 1.100 km do rio Amazonas, com uma área de quase 40 mil quilômetros quadrados (km<sup>2</sup>), entre as confluências com o rio Negro, na altura de Manaus, e com o

Simulação do fluxo da água no rio Amazonas e na região central da bacia amazônica e suas planícies de inundação durante o pico da cheia de junho de 2009. As cores representam a velocidade da água de 0 (azul) até 2 metros por segundo (vermelho)

rio Xingu, em Porto de Moz, a leste de Santarém, a partir do relevo estimado por imagens de satélites, como os da série Landsat, da agência espacial norte-americana (Nasa). Modelos como esse são comuns em hidrologia, mas detalhando regiões bem menores. “Não existem muitos exemplos no mundo de um modelo tão sofisticado”, afirma Paiva.

**M**edir a vazão de um rio tão grande é uma tarefa complexa. Entre Manaus e Santarém, a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) mantém algumas estações fluviométricas que monitoram continuamente o nível do Amazonas. Nas estações do porto de Manaus, esse monitoramento remonta a 1902. Pesquisadores do Serviço Geológico do Brasil (SGB) medem a vazão diretamente apenas algumas vezes por ano, utilizando um equipamento chamado de perfilador acústico de correntes por efeito Doppler (ADCP), que usa pulsos de ultrassom para determinar a velocidade da água em diferentes profundidades. Os hidrólogos usam essas medidas para calibrar a chamada curva-chave, uma relação matemática entre a vazão e o nível medido pelas estações, que permite estimar a vazão do rio e da várzea em qualquer momento.

O modelo de Andrade utilizou essas estimativas de vazão do Amazonas e aquelas dos rios tributários, obtidas a partir de outro modelo de toda a bacia amazônica, desenvolvido anteriormente por Paiva e outros pesquisadores da UFRGS. A partir desses dados, o modelo usou as equações da hidrodinâmica para simular o

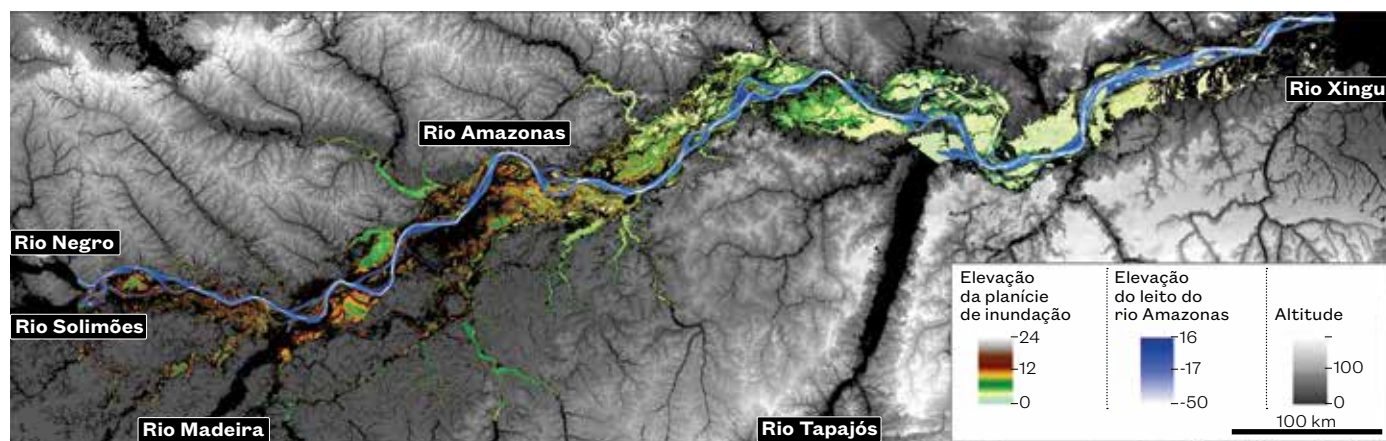


escoamento de água pela região em duas dimensões, entre os anos de 2008 e 2010. Com uma resolução espacial de 400 metros, a simulação demorou dias para ser concluída em um computador do tipo *workstation*.

Durante a defesa da tese de Andrade, um dos membros da banca, o hidrólogo Walter Collischonn, também da UFRGS, foi o primeiro a notar que o modelo sugeria um fluxo muito elevado so-

## Escoando em vastas planícies

Mapeamento do relevo permite simular a vazão dos rios nas áreas alagadas em direção ao Atlântico



FONTE ALICE FASSONI (UNB)



Casas e morador da planície inundável do Lago Grande de Curuai, em Santarém (PA), durante a cheia de junho de 2022



bre as planícies de inundação, comparável ao de um grande rio. Em 2022, trabalhando em outro projeto, Andrade participou de uma expedição do SBG para medir a vazão na planície do Lago Grande do Curuai, durante o pico da cheia, em junho. A pesquisadora estava com o hidrólogo Ayan Fleischmann, ex-aluno de doutorado de Collischonn e atualmente no Instituto de Desenvolvimento Sustentável Mamirauá, em Tefé, Amazonas. A vazão medida em Curuai chegou quase a 17 mil  $m^3/s$  – a mesma vazão média do Mississippi, o maior rio da América do Norte. Mais tarde, descobriram que pesquisadores do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (Inpe) já haviam feito medidas semelhantes no mesmo local, registrando 19 mil  $m^3/s$ , em junho de 2006, e 12 mil  $m^3/s$ , em julho de 2014.

Foi o que motivou a equipe a criar curvas-chave, relacionando os resultados do modelo de Andrade aos dados das estações fluviométricas entre 1970 e 2023, para estimar o histórico das vazões nas maiores planícies de inundação desse trecho do rio, com 40 a 50 km de largura: Jatuarana, em Manaus; Parintins, em Parintins; Curuai, em Santarém; e Monte Alegre, em Monte Alegre, no Pará. Os resultados mostraram que pequenas mudanças na vazão do rio ao longo de décadas foram amplificadas em até 13 vezes nas planícies de inundação. “Diante disso, propomos que é necessário monitorar continuamente os

fluxos de água nas planícies, o que ainda não é feito”, afirma Andrade.

**D**e acordo com os pesquisadores, o aumento não linear nos fluxos do rio e nas planícies depende de variáveis como profundidade, largura, declividade e resistência da vegetação, que freia as correntezas. Para ajudar a entender como pequenas variações no rio podem provocar grandes alterações na planície, Andrade dá um exemplo envolvendo apenas profundidade. “Se a profundidade de um rio aumenta de 50 para 55 metros [m], o aumento relativo é de 10%”, ela explica. “Agora, se o nível da água na planície, que é mais rasa que o rio, sobe de 2 para 7 m, o aumento relativo é de 250%.”

“É um trabalho muito importante”, considera o ecólogo Jochen Schöngart, do Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (Inpa), em Manaus, que não participou da pesquisa. De acordo com ele, o aumento observado da vazão nas várzeas vai ao encontro das conclusões de outros estudos, mostrando uma intensificação do ciclo hidrológico da bacia amazônica no século XXI. Dados da estação do porto de Manaus revelam um aumento de 18% na diferença entre o nível mínimo e máximo do Amazonas em relação ao século anterior. Essa tendência de secas e cheias cada vez mais

# Uma fonte de biodiversidade

Rios da Amazônia moldaram o relevo e promoveram a distribuição de espécies ao longo de 500 mil anos

Uma equipe liderada pelos geólogos Cristiano Galeazzi, da Universidade de Tecnologia de Chengdu, na China, e Renato Almeida, da Universidade de São Paulo (USP), reconstruiu as mudanças no curso de oito dos principais rios da Amazônia Central, ao longo de cerca de 500 mil anos. Entre eles estão o Solimões (nome do rio Amazonas antes da confluência com o rio Negro) e alguns de seus afluentes, como o Juruá e o Madeira. O estudo sugere que o deslocamento desses rios pela planície amazônica poderia explicar a distribuição atual de seis grandes áreas de endemismo – regiões delimitadas pelos rios atuais, onde vivem muitas espécies exclusivas, sobretudo aves e macacos.

A pesquisa demandou viagens floresta adentro para analisar as camadas sedimentares de grandes barrancos expostos nos rios Solimões e Japurá, mas começou na frente do computador. Analisando imagens de radar de alta precisão do terreno da Amazônia Central, obtidas durante uma missão do ônibus espacial *Endeavour*, da Nasa, em 2000, os pesquisadores identificaram conjuntos de cristas e depressões em forma de

arcos, com mais de 2 km de raio, espalhados pelo interior da floresta. Esses vestígios de meandros abandonados são uma prova de que os grandes rios da região já cruzaram terrenos hoje mais elevados de seus canais. “Os rios migravam por áreas bem mais amplas”, afirma Galeazzi.

De acordo com o estudo publicado na revista *Science Advances*, até cerca de 350 mil anos atrás, a Amazônia Central era uma planície ainda mais suave, com rios serpenteando entre florestas e pântanos frequentemente alagados – uma paisagem distinta da atual, marcada por terraços de florestas de terra firme, cortados por vales com florestas de várzea. À medida que mudava de curso, cada rio depositava grandes quantidades de areia e lama ao longo de extensas áreas chamadas de leques aluviais. Esse cenário começou a mudar há cerca de 350 mil anos, quando quedas no nível do mar, associadas ao aumento do gelo nas calotas polares, reduziram o nível dos rios, que passaram a escavar vales mais profundos. “Com a incisão dos vales, áreas mais altas ficaram fora do alcance das águas dos rios,

transformando leques em terra firme”, explica Galeazzi.

O processo se repetiu ao menos quatro vezes, em episódios separados por dezenas de milhares de anos, expandindo a área coberta pelos terraços de 150 metros (m) a 30 m de altura. Ao mesmo tempo, o avanço da terra firme permitiu a colonização gradual da planície por espécies vindas de regiões vizinhas mais elevadas. Cada população de espécies ocupou seis áreas distintas separadas pelos rios. “Os rios de hoje separam ecossistemas que antes estavam mais distantes uns dos outros”, explica o geólogo.

Essas evidências sugerem uma interpretação mais complexa da hipótese proposta inicialmente pelo naturalista britânico Alfred Russel Wallace (1823-1913), segundo a qual os grandes rios amazônicos seriam barreiras geográficas capazes de separar espécies de animais distintas em margens opostas. O estudo mostrou que a diversificação de espécies antecede a paisagem atual, e que os rios funcionam como barreiras dinâmicas, criando, modificando, separando e aproximando habitats ao longo do tempo.



Próximo a Manaus, o Negro, um dos rios que funcionam como barreiras dinâmicas, criando, separando e aproximando habitats

# Sem as plantas e árvores da várzea, o impacto das cheias seria ainda maior

intensas também está registrada em diferenças nos anéis de crescimento de árvores, como a arapari (*Macarobium acaciifolium*) e o cedro-cheiroso (*Cedrela odorata*). Em 2025, uma equipe de pesquisadores do Reino Unido e do Brasil, da qual Schöngart fez parte, publicou uma análise de isótopos estáveis de oxigênio nessas espécies, mostrando o aumento da precipitação na estação chuvosa e a diminuição das chuvas no período seco, durante os últimos 40 anos.

Paiva explica que essa intensificação de secas e inundações na Amazônia

é prevista pelos modelos do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), que levam em conta o aquecimento global provocado pelo aumento das emissões de gases estufa. Esses modelos também indicam um aumento das chuvas no noroeste da bacia amazônica, no Peru e na Bolívia, juntamente com uma redução no sul, o que pode afetar afluentes importantes como os rios Tapajós e Xingu. “Existe muita incerteza sobre como essa combinação de mudanças no regime de chuvas vai afetar o Amazonas no futuro”, ele explica.

**A** metodologia do estudo das várzeas não permitiu analisar períodos de seca com precisão, mas outras pesquisas envolvendo colaboradores da equipe conseguiram avaliar, por meio de imagens de satélite, os impactos da seca recorde de 2023. Um estudo liderado por Fleischmann mostrou que a seca, combinada a uma onda de calor, elevou perigosamente as temperaturas dos lagos da Amazônia Central. As águas do lago Tefé chegaram a 41 graus Celsius, provocando a morte de mais de 200 botos vermelhos (*Inia geoffrensis*) e tucuxis (*Sotalia fluviatilis*) (ver Pesquisa FAPESP nº 358). Já um estudo coordenado pelo hidrólogo Daniel Maciel, do Inpe, revelou uma redução de 8% na superfície coberta por água da Amazônia Central durante os piores meses da seca, em relação à média de anos anteriores, com alguns lagos encolhendo em até 80%. Em contraste, outro estudo liderado por Fleischmann mostrou que a extensão máxima de todas as áreas alagadas durante enchentes do Amazonas aumentou 26% desde 1980.

“O estudo de Andrade mostra que enchentes muito intensas não causam impactos apenas por atingirem níveis elevados de água, mas também porque aumentam a velocidade com que a água se movimenta dentro das planícies de inundação”, comenta o ecólogo Leandro Castello, do Instituto Politécnico e Universidade Estadual da Virgínia, Estados Unidos, especialista em peixes da Amazônia, que não participou da pesquisa. “O aumento da velocidade da água tende a acelerar os processos de erosão, o transporte de sedimentos e de matéria orgânica, especialmente detritos, folhas, frutos e pequenos organismos que caem das árvores.”

“Ainda é difícil prever com precisão como o aumento da velocidade da água afetará os peixes”, avalia Castello. Ele lembra que muitas espécies podem ter dificuldades, como o pirarucu (*Arapaima gigas*), o tucunaré (*Cichla* spp.) e o acará-açu (*Astronotus ocellatus*), que vivem geralmente em lagos e dependem de áreas com correnteza mais lenta, onde se alimentam de frutos e outros itens que caem das árvores inundadas. Mas outras espécies talvez possam ser beneficiadas pelas novas condições.

Schöngart lembra da importância das plantas aquáticas e das árvores da várzea em absorver a força das águas. Sem elas, o impacto das cheias extremas para as populações ribeirinhas seria ainda maior. Estima-se que um sexto da biodiversidade de árvores da Amazônia venha da floresta de várzea, que por sua vez é cercada por uma grande abundância de espécies de gramíneas e outras plantas aquáticas, como o aguapé (*Eichhornia crassipes*). Entretanto, poucas áreas da várzea do Amazonas estão protegidas por unidades de conservação.

Entender melhor como a aceleração das cheias afeta a biodiversidade e as populações é um dos objetivos do Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia Rede de Paisagens Úmidas Brasileiras, criado em 2025 pelo Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação e coordenado por Schöngart. Andrade faz parte de um dos projetos interdisciplinares do instituto, coordenado por Fleischmann e o ecólogo Rafael Magalhães Rabelo, também do Instituto Mamirauá.

O objetivo desse projeto de pesquisa é propor um zoneamento ecológico-econômico da várzea da Amazônia Central, mapeando as vulnerabilidades e a resiliência de cada macro-habitat da região frente a secas e cheias extremas, cada vez mais comuns na região. “Vamos fornecer informações relevantes para políticas públicas voltadas à conservação da várzea”, afirma Schöngart. ●

Os artigos científicos consultados para esta reportagem estão listados na versão on-line.